

Климатические системы: расчет воздухообмена в помещении

Коммерческий директор Л.Л. Гошка*,
ООО «Кола»

В климатизации зданий одним из важнейших параметров является воздухообмен в помещении. Он обозначается символом L и имеет размерность $\text{м}^3/\text{час}$. В данной статье мы попробуем установить физический смысл данного параметра. Можно предположить, что он гораздо глубже, чем обеспечение помещения кислородом и удаление из него углекислого газа.

Для этого обратимся к примеру, когда в ночь на 27 августа 2009 года в Косино-Ухтомском районе (Москва) было отмечено превышение ПДК по сероводороду в 5 раз [1]. Пусть ПДК по сероводороду равняется $C_{\text{пдк}}$, тогда концентрация по сероводороду в атмосферном воздухе будет $C_{\text{атм}} = 5 \cdot C_{\text{пдк}}$. Пусть житель данного района, назовем его М., спал с открытым окном. Тогда можно ожидать, что к утру в помещении гражданина М концентрация сероводорода в воздухе будет также $C_{\text{пом}} = 5 \cdot C_{\text{пдк}}$.

Пусть площадь комнаты $S=18 \text{ м}^2$, высота потолков $h=3$ метра, тогда объем комнаты составит $V=18 \cdot 3=54 \text{ м}^3$. Пусть в помещении система вентиляции с естественным побуждением. В помещении установлены герметичные стеклопакеты. Уходя утром на работу, гражданин М закрыл окно. При закрытом окне (стеклопакете) система вентиляции с естественным побуждением практически не работает, следовательно, возвратившись вечером домой, он может иметь в своей комнате концентрацию сероводорода $C_{\text{пом}}=5 \cdot C_{\text{пдк}}$. Для того чтобы привести воздух в помещении к уровню ПДК, помещение необходимо проветрить, т.е. привести к значению $C_{\text{пом}} = C_{\text{пдк}}$. Пусть в помещении естественная вентиляция, по тем или иным причинам, обеспечивает расход наружного воздуха в $L=20 \text{ м}^3/\text{час}$, но он после трудового дня хочет комфортных условий, а за окном пыль и шум. Для того чтобы в помещение поступало меньше шума, пыли и не было сквозняка, он только чуть-чуть приоткрыл форточку, тем самым обеспечил расход наружного воздуха в $L=20 \text{ м}^3$ в час.

Нас будет интересовать вопрос, сколько атмосферного воздуха $V_{\text{нар}}$ потребуется гражданину М для проветривания своего помещения.

Для ответа на вопрос воспользуемся руководством Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» [2].

6.4.1.2. Оценка воздействующих концентраций включает определение концентраций химических веществ, воздействующих на человека в течение периода экспозиции.

6.1.2 Экспозиция (воздействие) – контакт организма (рецептора) с химическим, физическим или биологическим агентом. Величина экспозиции определяется как измеренное или рассчитанное количество агента в конкретном объекте окружающей среды, находящееся в соприкосновении с так называемыми пограничными органами человека (легкие, пищеварительный тракт, кожа) в течение какого-либо точно установленного времени. Экспозиция может быть выражена как общее количество вещества в окружающей среде (в единицах массы, например, мг), или как величина воздействия – масса вещества, отнесенная к единице времени (например, мг/день), или как величина воздействия, нормализованная с учетом массы тела $\text{мг}/(\text{кг} \times \text{день})$.

6.1.7. Полный сценарий экспозиции, отражающий воздействие на население в реальных условиях, включает оценку поступления химических веществ в организм человека одновременно из разных сред (атмосферный воздух, питьевая вода, вода поверхностного водоема, почва, продукты питания) различными путями (пероральный, ингаляционный, накожный). Такой тип экспозиции характеризуется как многосредовое и комплексное воздействие.

6.4.1.3. Концентрация – это содержание конкретного загрязнителя в конкретной среде (например, воздушной) на единицу ее объема (например, $\text{мг}/\text{м}^3$) в определенный промежуток времени. Все замеры концентраций прямо или косвенно связаны с временным интервалом. Даже так называемые приборы непрерывного действия имеют предельное, порой весьма короткое время отклика, и поэтому их показания отражают среднее (или приближенное к среднему) значение фактических концентраций в течение ограниченного времени.

6.4.6.1. Экспозиция характеризует контакт организма с химическим агентом. Если экспозиция имеет место в течение определенного периода времени, то общая экспозиция должна быть разделена на тот временной интервал, который интересует исследователя. Полученная таким образом величина представляет собой среднюю величину экспозиции на единицу времени.

7.4.12. При ингаляционном поступлении, если только это не диктуется специальными задачами исследования, нет необходимости рассчитывать дозу воздействия и расчет коэффициента опасности может осуществляться по формуле (формула 7.11):

$$HQ_i = C_i/RfC, (7.11)$$

где HQ – коэффициент опасности воздействия вещества i;

C_i – уровень воздействия вещества i, мг/м³;

RfC – безопасный уровень воздействия, мг/м³.

7.4.13. Если рассчитанный коэффициент опасности (HQ) вещества не превышает единицу, то вероятность развития у человека вредных эффектов при ежедневном поступлении вещества в течение жизни незначительна и такое воздействие характеризуется как допустимое.

7.4.14. Если коэффициент опасности превышает единицу, то вероятность возникновения вредных эффектов у человека возрастает пропорционально увеличению HQ, однако точно указать величину этой вероятности невозможно.

Условия задачи следующие.

1. Объем помещения $V_{\text{пом.}} = 54 \text{ м}^3$.
2. Режим работы системы вентиляции: форточка открыта – работает, форточка закрыта – не работает. Окно герметичное, следовательно, естественная вентиляция функционирует только при открытой форточке.
3. Расход наружного воздуха $L = 20 \text{ м}^3/\text{час}$.
4. Концентрация сероводорода в помещении в начальный момент времени (перед открытием форточки) составляет $C_{\text{пом}} = 5C_{\text{пдк}}$.
5. В помещении источника загрязнения сероводородом нет, т.к. загрязнение произошло за счет атмосферного воздуха.
6. Пусть в начальный момент времени t_0 (перед открытием форточки) атмосферный воздух уже не содержит сероводород $C_{\text{атм}} = 0$.

Вопрос: «Сколько наружного воздуха $V_{\text{нар}}$ потребуется гражданину М для того, чтобы в помещении концентрация сероводорода составила $C_{\text{пом}} = C_{\text{пдк}}$?»

В основе воздухообмена заложен принцип разбавления (снижения концентрации) различных химических соединений, содержащихся в воздухе помещения и обеспечение воздуха в помещении кислородом за счет атмосферного воздуха.

Количественные соотношения, устанавливающиеся при разбавлении растворов водой, смешении растворов, газов или твердых материалов различных концентраций можно найти на основании материального баланса.

Для случая смешения двух растворов одного вещества этот баланс представляется в виде следующего уравнения:

$$C \cdot V = C' \cdot V' + C'' \cdot V'',$$

где V – объем смешанного раствора с концентрацией C ;

V' и V'' – объемы растворов, которые смешиваются и имеют концентрации C' и C'' .

Из уравнения материального баланса определяется любая из искомых величин, если заданы остальные. Например:

$$\begin{aligned} V &= V' + V''; \\ C \cdot (V' + V'') &= C' \cdot V' + C'' \cdot V'', \\ C &= (C'V' + C''V'') / (V' + V''); \end{aligned}$$

В нашем случае: $C' = C_{\text{пом}} = 5C_{\text{пдк}}$, $C'' = C_{\text{атм}} = 0$, $V' = V_{\text{пом.}} = 54 \text{ м}^3$, $V'' = V_{\text{нар}}$, $C = C_{\text{пдк}}$.

Таким образом, для нашей задачи мы получаем:

$$C = (C_{\text{пом}} \cdot V_{\text{пом.}}) / (V_{\text{пом.}} + V_{\text{нар}}).$$

Но в отличие от традиционного разбавления, когда объем V после смешивания равен $V = V' + V''$ у нас объем помещения фиксирован и имеет значение $V_{\text{пом.}} = 54 \text{ м}^3$, т.е. $V_{\text{пом.}} = V = V'$. Поэтому мы будем разбавлять воздух в помещении небольшими порциями. Для этого требуется, чтобы выполнялось условие:

$$V_{\text{пом.}} \gg \Delta V_{\text{нар.}}$$

Пусть

$$\Delta V_{\text{нар.}} = V_{\text{нар.}} / 60 = 0,33 \text{ м}^3.$$

Гошка Л.Л. Климатические системы: расчет воздухообмена в помещении

Тогда:

$$C_1 = (C_{\text{пом}} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}})$$

$$C_2 = (C_1 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}})$$

$$C_3 = (C_2 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}})$$

.....

$$C_{n-1} = (C_{n-2} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}})$$

$$C_{\text{пдк}} = C_n = (C_{n-1} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}).$$

Учитывая, что

$$C_{\text{пом}} = K_0 \cdot C_{\text{пдк}}, K_0 = 5,$$

Тогда наше выражение примет вид:

$$C_1 / C_{\text{пдк}} = (K_0 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}})$$

$$C_2 / C_{\text{пдк}} = (K_1 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}})$$

$$C_3 / C_{\text{пдк}} = (K_2 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}})$$

.....

$$C_{n-1} / C_{\text{пдк}} = (K_{n-2} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}})$$

$$C_n / C_{\text{пдк}} = (K_{n-1} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}),$$

где $K_1 = C_1 / C_{\text{пдк}}$, $K_2 = C_2 / C_{\text{пдк}}$, $K_{n-1} = C_{n-1} / C_{\text{пдк}}$, $K_n = C_n / C_{\text{пдк}} = 1$.

Другими словами, для того чтобы определить, какой объем атмосферного воздуха ($V_{\text{нар}}$) нам необходимо подать в помещение, в котором требуется понизить концентрацию сероводорода с уровня $C_{\text{пом}} = 5 \cdot C_{\text{пдк}}$ до уровня $C_{\text{пом}} = 1 \cdot C_{\text{пдк}}$, мы на первом шаге в помещении объемом $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$ подаем наружный воздух объемом $\Delta V_{\text{нар}} = 0,33 \text{ м}^3$. При этом предполагаем, что перемешивание в объеме помещения происходит тщательно по всему объему помещения и практически моментально. Далее, сбрасывая из помещения в атмосферу объем воздуха, равный $V = 0,33 \text{ м}^3$, мы тем самым предполагаем, что объем помещения у нас всегда постоянный. После первого шага концентрация сероводорода в помещении станет равной C_1 или $C_1 < C_{\text{пом}}$. Данную процедуру мы будем проделывать n раз, пока концентрация сероводорода в помещении не достигнет уровня ПДК, т.е. уровня $C_n = C_{\text{пдк}}$.

В соответствии с руководством Р 2.1.10.1920-04 величина $HQ_i = C_i / C_{\text{пдк}}$, а $K_i = C_i / C_{\text{пдк}} = HQ_{0i}$. Таким образом, мы получаем, что пошаговый коэффициент опасности воздействия сероводорода, содержащегося в воздухе помещения, имеет вид:

$$HQ_i = (HQ_{0i-1} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}), (1)$$

Результаты расчетов приведены в свернутой таблице №1 и изображены на рис. 1. Решением данного уравнения является следующее выражение:

$$HQ_i = HQ_0 / [(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}]^i (2)$$

где i от 1 до n .

Наша задача заключается в том, чтобы разбавить концентрацию сероводорода в воздухе помещения до такого уровня, при которой коэффициент опасности воздействия сероводорода был бы равен единице, т.е. $HQ_i = 1$ при $i=n$. Тогда выражение (2) принимает вид:

$$[(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}]^n = HQ_0 (3)$$

Прологарифмируем данное выражение:

$$n \cdot \lg[(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}] = \lg HQ_0$$

Из этого выражения находим n :

$$n = \lg HQ_0 / \lg[(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}] (4)$$

или в нашем случае:

$$n = \lg 5 / \lg[(54+0,33)/54] = 264$$

Сравним его с табличным значением (таблица №1). Табличное значение составляет $n = 262$. Два данных значения хорошо согласуются между собой.

Таблица №1 Начальные данные: $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$, $\Delta V_{\text{нар}} = 0,33 \text{ м}^3$, $HQ_0 = 5$, $HQ_n = 1$, $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$

№ п/п	$V_{\text{пом}}, \text{ м}^3$	$\Delta V_{\text{нар}}, \text{ м}^3$	$V = V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}, \text{ м}^3$	$V_{\text{нар}}, \text{ м}^3$	HQ_0	Расчет по формуле (2)	Кол-во шагов, n	$t = n/60$, часов
1	54	0,00	54,00	0,00	5,0000	5,0000	0	0,00
15	54	0,33	54,33	4,95	4,5873	4,5912	14	0,23
30	54	0,33	54,33	9,90	4,1829	4,1902	29	0,48
45	54	0,33	54,33	14,85	3,8141	3,8242	44	0,73
60	54	0,33	54,33	19,80	3,4778	3,4903	59	0,98
76	54	0,33	54,33	25,08	3,1517	3,1661	75	1,25
91	54	0,33	54,33	30,03	2,8738	2,8896	90	1,50
106	54	0,33	54,33	34,98	2,6205	2,6372	105	1,75
121	54	0,33	54,33	39,93	2,3894	2,4069	120	2,00
136	54	0,33	54,33	44,88	2,1787	2,1967	135	2,25
152	54	0,33	54,33	50,16	1,9745	1,9927	151	2,52
167	54	0,33	54,33	55,11	1,8004	1,8187	166	2,77
182	54	0,33	54,33	60,06	1,6416	1,6598	181	3,02
197	54	0,33	54,33	65,01	1,4969	1,5149	196	3,27
212	54	0,33	54,33	69,96	1,3649	1,3825	211	3,52
227	54	0,33	54,33	74,91	1,2446	1,2618	226	3,77
242	54	0,33	54,33	79,86	1,1349	1,1516	241	4,02
258	54	0,33	54,33	85,14	1,0284	1,0446	257	4,28
263	54	0,33	54,33	86,79	0,9973	1,0133	262	4,37

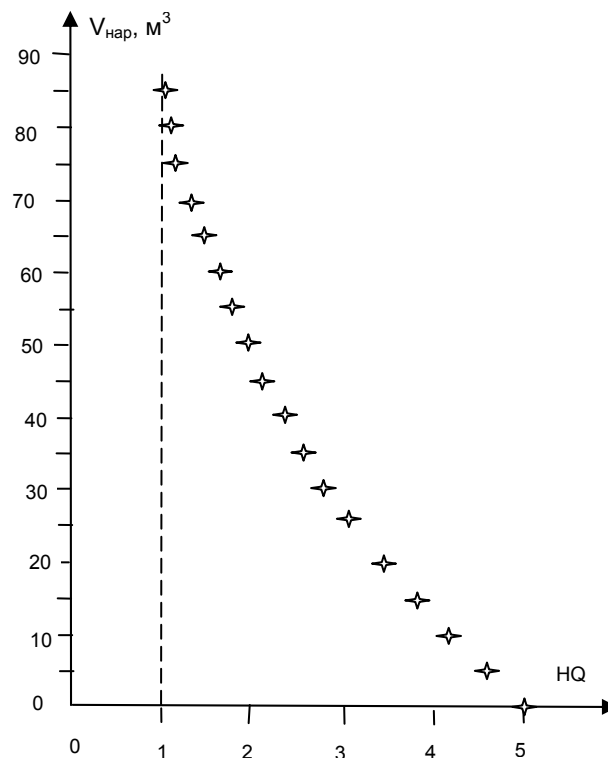


Рисунок 1. График зависимости изменения объема атмосферного воздуха в м^3 , необходимого для разбавления концентрации сероводорода в помещении со значения коэффициента опасности воздействия его от значения $HQ_0=5$ и до значения $HQ_n=1$. $V_{\text{пом}}=54 \text{ м}^3$. $HQ_{0 \text{ атм}}=0$. Расчет делался поминутно.

Далее переформулируем нашу задачу:

1. Какой объем атмосферного воздуха $V_{\text{нар}}$ в м^3 потребуется подать гражданину М в свое помещение объемом $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$, для того чтобы понизить коэффициент опасности воздействия сероводорода, который в начальный момент времени $t_0=0$ составлял $HQ_0=5$, до уровня $HQ=1$?
2. Сколько времени на это потребуется?

Тогда объем атмосферного воздуха $V_{\text{нар}}$, который нам необходимо подать в помещение, будет определяться как:

$$V_{\text{нар}} = \sum \Delta V_{i \text{ нар}},$$

где i от 1 до n ,

или

$$V_{\text{нар}} = \Delta V_{\text{нар}} \cdot n, \quad (5)$$

Подставляем в (5) расчетные значения:

$$V_{\text{нар}} = 0,33 \cdot 264 = 87,12 \text{ м}^3.$$

Полученное расчетное значение объема воздуха сопоставляем с табличным значением (Таблица №1), которое равно $V_{\text{нар}}(\text{табл}) = 86,79 \text{ м}^3$.

В выражение (5) подставляем n из (4):

$$V_{\text{нар}} = \Delta V_{\text{нар}} \cdot \lg HQ_0 / \lg [(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}] \quad (6)$$

Следовательно, для того чтобы понизить коэффициент опасности воздействия сероводорода, который в начальный момент времени $t_0=0$ составлял $HQ_0=5$, до уровня $HQ=1$, гражданину М потребуется подать в свое помещение объемом $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$ атмосферный воздух в объеме не менее $V_{\text{нар}} = 87 \text{ м}^3$.

Для того чтобы процедура разбавления была ограничена по времени, каждый шаг будем делать за одну минуту. Умножим и разделим n на время:

$$n = n \cdot 1 \text{ мин} / 1 \text{ мин.}$$

Подставляем полученное выражение в (5):

$$V_{\text{нар}} = \Delta V_{\text{нар}} \cdot n \cdot 1 \text{ мин} / 1 \text{ мин.}$$

Тогда расход наружного воздуха будет равен $L' = \Delta V_{\text{нар}} / t$ ($\text{м}^3/\text{мин.}$) Величина $t' = n \cdot 1 \text{ мин}$ - это время, которое необходимо для снижения значения коэффициента опасности воздействия сероводорода, содержащегося в воздухе помещения, на организм человека с уровня $HQ_0=5$ до уровня $HQ = 1$.

Тогда:

$$V_{\text{нар}} = L' \cdot t'.$$

Переведем время в часы $t = t' / 60$, а расход наружного воздуха м^3 в час $L(\text{м}^3/\text{час}) = 60 \cdot L' (\text{м}^3/\text{мин})$. Тогда объем атмосферного воздуха ($V_{\text{нар}}$), который нам необходимо подать в помещение, можно будет определить как:

$$V_{\text{нар}} = L \cdot t \quad (7)$$

Из выражения (7) можно определить зависимость времени экспозиции в часах от расхода наружного воздуха (рис. 2):

$$t = V_{\text{нар}} / L. \quad (8)$$

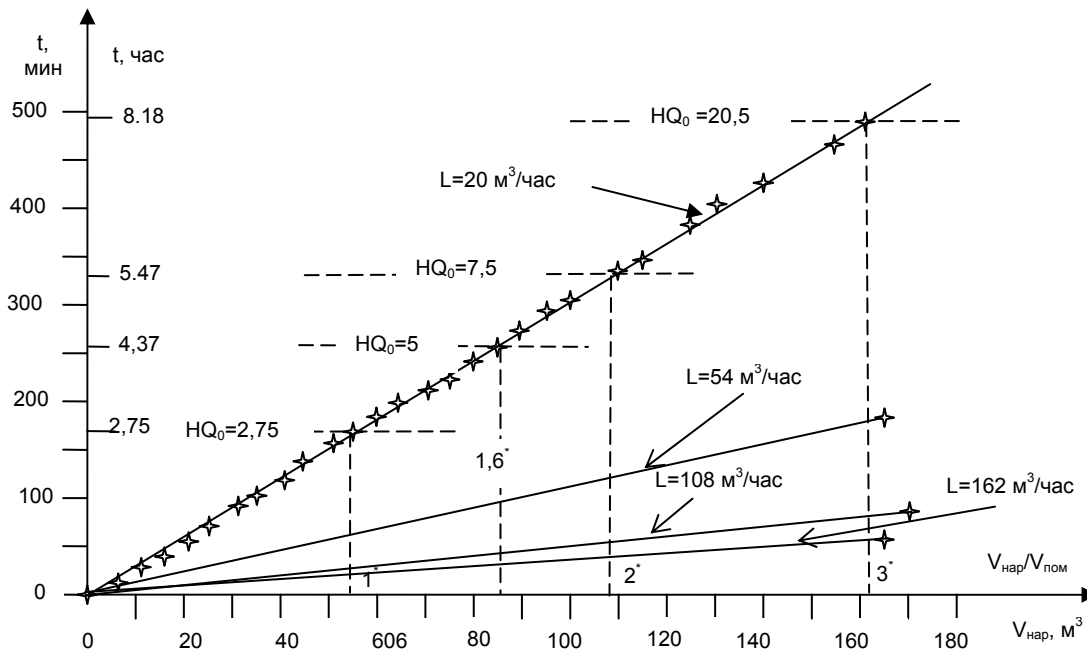


Рисунок 2. График зависимости изменения времени экспозиции от объема атмосферного воздуха в м^3 , который необходимо подать в помещение для снижения значения коэффициента опасности воздействия сероводорода на организм человека до допустимого уровня $HQ_0=1$ при различных значениях расхода наружного воздуха L . $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$. $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$. Расчет делался по минутно.

Подставляем в (8) расчетные значения $V_{\text{нар}} = 87,12 \text{ м}^3$ и $L = 20 \text{ м}^3/\text{час}$:

$$t = 87,12 / 20 = 4,36 \text{ часа.}$$

Табличное значение (таблица №1) $t_{\text{табл}} = 4,37$ часа, что хорошо согласуется с расчетным значением.

Подставляем в (8) выражение (6), получаем:

$$t = \Delta V_{\text{нар}} \cdot \lg HQ_0 / \lg[(V_{\text{пом.}} + \Delta V_{\text{нар}} / V_{\text{пом.}})] \cdot 1/L \quad (9)$$

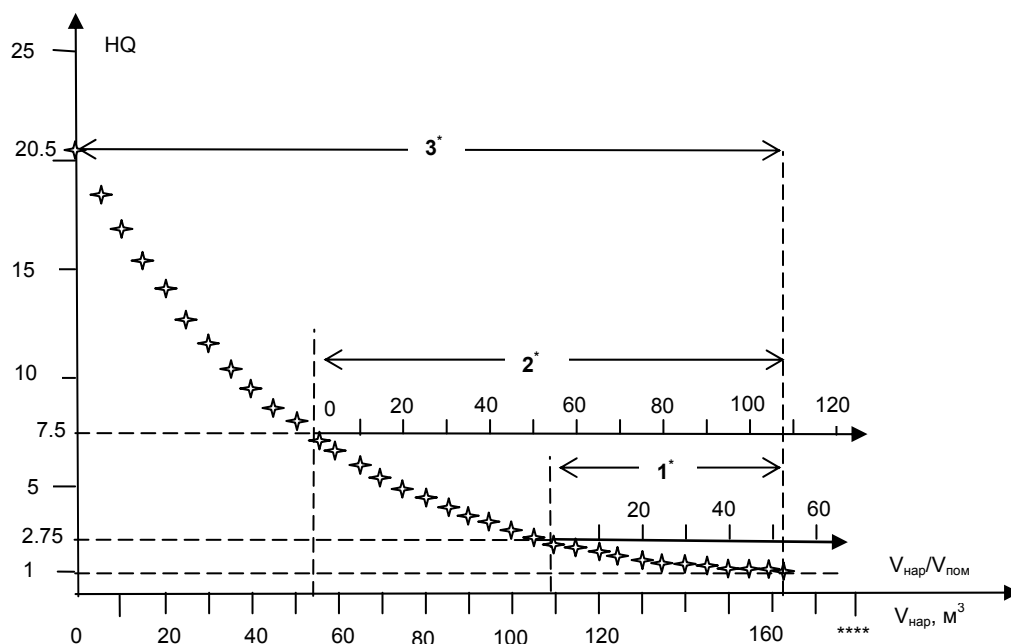


Рисунок 3. График зависимости изменения коэффициента опасности воздействия вещества от объема атмосферного воздуха в m^3 , который необходимо подать в помещение для снижения значения коэффициента опасности воздействия вещества содержащегося в воздухе помещения на организм человека до допустимого уровня $HQ_0=1$.

Объем помещения $V_{пом} = 54 m^3$. Объем наружного воздуха подаваемый в помещение $V_{нар} = 0,33 m^3$ за одну минуту ($20 m^3$ за один час). $HQ_{0 атм} = 0$. Расчет делался поминутно.

Таким образом, если вне зависимости от химического состава воздуха известен самый высокий коэффициент опасности воздействия отдельно взятого вещества, который содержится в воздухе помещения, то при отсутствии источника загрязнения внутри помещения обеспечить качество воздуха в нем можно с течением времени при любом выбранном расходе наружного воздуха (рис. 3). Следовательно, расход наружного воздуха, или воздухообмен, влияет только на время экспозиции (рис. 4, 5). В свою очередь, время экспозиции влияет на вероятность возникновения вредных эффектов в организме человека. Вредные эффекты возрастают пропорционально увеличению коэффициента опасности воздействия вещества HQ . Поэтому, понижая расход наружного воздуха, проектировщик может увеличивать количество вредных воздействий на организм человека.

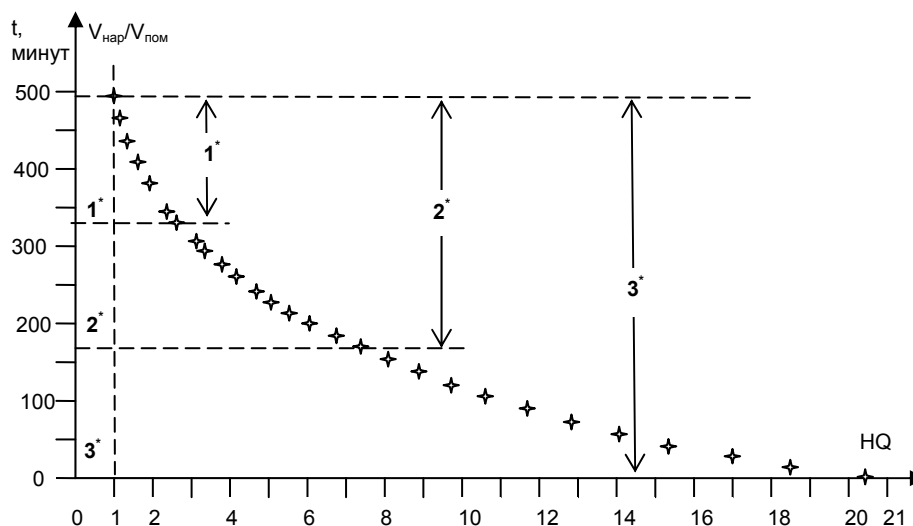


Рисунок 4. График зависимости изменения времени экспозиции при изменении коэффициента опасности вещества содержащегося в воздухе помещения. Объем помещения $V_{пом} = 54 m^3$. Объем атмосферного воздуха подаваемый в помещение $V_{нар} = 0,33 m^3$ за одну минуту ($20 m^3/час$). $HQ_{0 атм} = 0$. Расчет делался поминутно.

Другими словами, проектировщик, определяя воздухообмен в помещении, может управлять рисками отрицательного воздействия воздуха в помещении на организм конечного пользователя климатических систем, варьируя через расход наружного воздуха время экспозиции (рис. 5, 6).

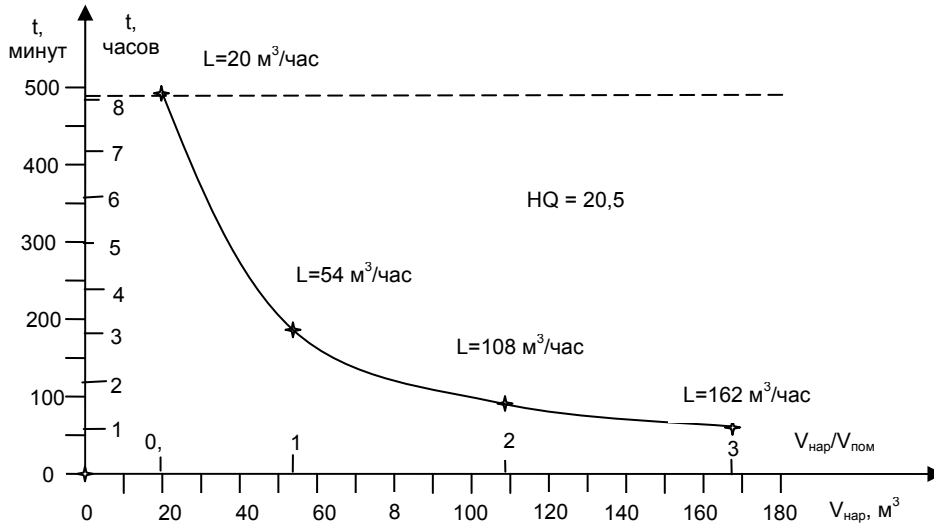


Рисунок 5. График зависимости изменения времени экспозиции от объема атмосферного воздуха в м³, который необходимо подать в помещение для снижения значения коэффициента опасности воздействия вещества содержащегося в воздухе помещения на организм человека до допустимого уровня HQ₀=1 при различных значениях расхода наружного воздуха L. При коэффициенте опасности воздействия вещества в начальный момент времени равном HQ₀ = 20,5. Объем помещения V_{пом}= 54 м³. HQ_{0 атм}=0. Расчет делался поминутно.

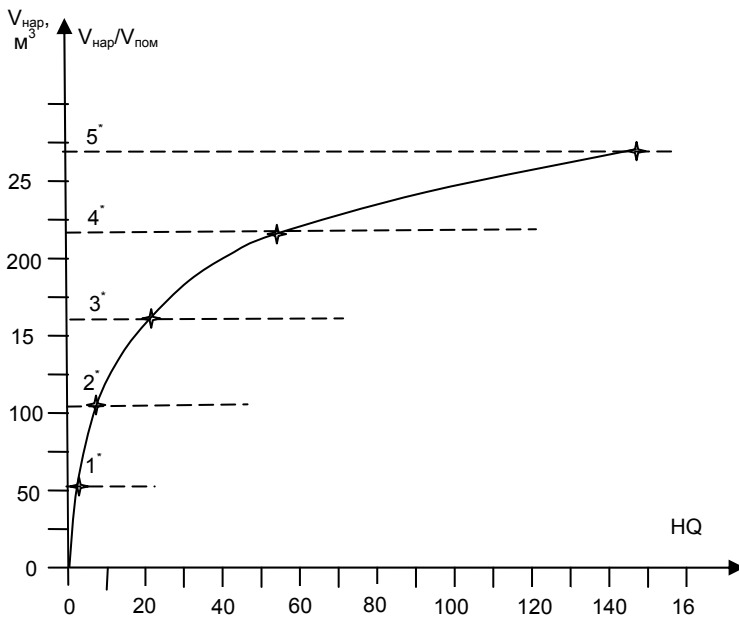


Рисунок 6. График зависимости изменения объема атмосферного воздуха в м³ (кратности смены воздуха в помещении), который необходимо подать в помещение для снижения значения коэффициента опасности воздействия вещества, содержащегося в воздухе помещения, на организм человека до допустимого уровня HQ₀=1 при изменении коэффициента опасности воздействия вещества. Расчет делался поминутно

Для того чтобы в дальнейшем не повышать погрешность вычислений, будем различать:

- 1) кратность смены воздуха в помещении как отношение объема атмосферного воздуха, поступившего в помещение, к объему самого помещения, т.е. $k' = V_{нар}/V_{пом}$;
- 2) кратность воздухообмена как отношение расхода наружного воздуха в м³ в час к объему помещения, т.е. $k = L/V_{пом}$.

Правую и левую часть выражения (7) разделим на V_{пом}.

$$V_{нар}/V_{пом} = L \cdot t/V_{пом}$$

Величина $V_{нар}/V_{пом} = k'$ является кратностью смены воздуха в помещении, тогда:

$$k' = L \cdot t/V_{пом},$$

или

$$t = \kappa' \cdot V_{\text{пом}} / L = \kappa' / \kappa.$$

При объеме помещения $V_{\text{пом}}=54 \text{ м}^3$ и расходе наружного воздуха $L=20 \text{ м}^3/\text{час}$ расчетное значение коэффициента опасности воздействия вещества $HQ=1$ будет обеспечено:

- 1) при однократной смене воздуха в помещении через $t=2,7$ часа ($t_{\text{табл}}=2,75$ часа, таблица №2);
- 2) при двукратной смене воздуха в помещении через $t=5,4$ часа ($t_{\text{табл}}=5,47$ часа);
- 3) при трехкратной смене воздуха в помещении через $t=8,1$ часа ($t_{\text{табл}}=8,18$ часа).

Таблица 2. Начальные данные: $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$, $\Delta V_{\text{нар}} = 0,33 \text{ м}^3$, $HQ_0 = 2,75$, $HQ_0 = 7,5$, $HQ_0 = 20,50$, $HQ_n = 1$, $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$

№ п/п	$V_{\text{нар}}, \text{ м}^3$	HQ	Кол-во шагов, n	$t = n/60$, часов	$V_{\text{нар}}, \text{ м}^3$	HQ	Кол-во шагов, n	$t = n/60$, часов	$V_{\text{нар}}, \text{ м}^3$	HQ	Кол-во шагов, n	$t = n/60$, часов
1	0,00	20,50	0	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
17	5,28	18,58	16	0,27	-	-	-	-	-	-	-	-
32	10,23	16,94	31	0,52	-	-	-	-	-	-	-	-
47	15,18	15,45	46	0,77	-	-	-	-	-	-	-	-
62	20,13	14,08	61	1,02	-	-	-	-	-	-	-	-
77	25,08	12,84	76	1,27	-	-	-	-	-	-	-	-
92	30,03	11,71	91	1,52	-	-	-	-	-	-	-	-
108	35,31	10,61	107	1,78	-	-	-	-	-	-	-	-
123	40,26	9,68	122	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-
138	45,21	8,82	137	2,28	-	-	-	-	-	-	-	-
153	50,16	8,05	152	2,53	-	-	-	-	-	-	-	-
168	56,11	7,34	167	2,78	0,00	7,50	0	0,00	-	-	-	-
183	60,06	6,69	182	3,03	5,28	6,80	16	0,27	-	-	-	-
198	65,01	6,10	197	3,28	10,23	6,20	31	0,52	-	-	-	-
214	70,29	5,53	213	3,55	15,18	5,65	46	0,77	-	-	-	-
229	75,24	5,04	228	3,80	20,13	5,15	61	1,02	-	-	-	-
244	80,19	4,60	243	4,05	25,08	4,70	76	1,27	-	-	-	-
259	85,14	4,19	258	4,30	30,03	4,28	91	1,52	-	-	-	-
274	90,09	3,82	273	4,55	35,31	3,88	107	1,78	-	-	-	-
289	95,04	3,48	288	4,80	40,26	3,54	122	2,03	-	-	-	-
305	100,32	3,16	304	5,07	45,21	3,23	137	2,28	-	-	-	-
320	105,27	2,88	319	5,32	50,16	2,94	152	2,53	-	-	-	-
335	110,22	2,63	334	5,57	56,11	2,68	167	2,78	0,00	2,75	0	0,00
350	115,17	2,39	349	5,82	60,06	2,45	182	3,03	5,28	2,49	16	0,27
365	120,12	2,18	364	6,07	65,01	2,23	197	3,28	10,23	2,27	31	0,52
380	125,07	1,99	379	6,32	70,29	2,02	213	3,55	15,18	2,07	46	0,77
395	130,02	1,81	394	6,57	75,24	1,84	228	3,80	20,13	1,89	61	1,02
411	135,30	1,65	410	6,83	80,19	1,68	243	4,05	25,08	1,72	76	1,27
426	140,25	1,50	425	7,08	85,14	1,53	258	4,30	30,03	1,57	91	1,52
441	145,20	1,37	440	7,33	90,09	1,40	273	4,55	35,31	1,42	107	1,78
456	150,15	1,25	455	7,58	95,04	1,27	288	4,80	40,26	1,30	122	2,03
471	155,10	1,14	470	7,83	100,3	1,15	304	5,07	45,21	1,18	137	2,28
486	160,05	1,04	485	8,08	105,3	1,05	319	5,32	50,16	1,07	152	2,53
492	162,03	1,00	491	8,18	108,2	1,00	328	5,47	54,45	1,00	165	2,75

Пусть значение расхода наружного воздуха составляет $L=54 \text{ м}^3/\text{час}$, а объем помещения $V_{\text{пом}}= 54 \text{ м}^3$, т.е. при однократном воздухообмене и однократной смене воздуха в помещении:

$$t = \kappa' / \kappa = 1 \text{ час},$$

т.е. время экспозиции будет равно одному часу.

Определим, с какого начального коэффициента опасности воздействия вещества HQ_0 используемый однократный воздухообмен в помещении $k = 1^*$ или $L=54 \text{ м}^3/\text{час}$ может привести к максимально допустимому воздействию химических веществ на организм человека, т.е. к $HQ=1$?

Мы получили, что при однократном воздухообмене и однократной смене воздуха в помещении время экспозиции равно $t=1$ час, т.е. в данном случае $n=60$ шагов. Очевидно, что на 60-м шаге $HQ=1$, а $i=n$. Тогда выражение (2) принимает вид:

$$HQ_0 = [(V_{\text{пом.}} + \Delta V_{\text{нар.}}) / V_{\text{пом.}}]^n.$$

В правой части открываем круглые скобки:

$$HQ_0 = (1 + \Delta V_{\text{нар.}} / V_{\text{пом.}})^n.$$

Учитывая, что $\Delta V_{\text{нар.}} = V_{\text{нар.}} / n$:

$$HQ_0 = [1 + V_{\text{нар.}} / (n \cdot V_{\text{пом.}})]^n,$$

а $k' = V_{\text{нар.}} / V_{\text{пом.}}$ получаем:

$$HQ_0 = [1 + k' / n]^n$$

Таким образом, при однократном воздухообмене, равном однократной смене воздуха в помещении, получаем:

$$HQ_0 = [1 + 1/60]^{60} = 2,7.$$

Таким образом, при однократном воздухообмене, равном однократной смене воздуха в помещении, можно привести начальный коэффициент опасности воздействия вещества, равный $HQ_0=2,7$ ($HQ_{0 \text{ табл.}} = 2,75$, таблица №2), к допустимому значению $HQ=1$ за один час.

При достижении двукратной смены воздуха в помещении и при однократном воздухообмене время экспозиции составит:

$$t = k'/k = 2 \text{ часа},$$

т.е. $n = 120$ шагов.

Тогда коэффициент опасности воздействия вещества будет равен:

$$HQ_0 = [1 + 2/120]^{120} = 7,3 \text{ (} HQ_{0 \text{ табл.}} = 7,5 \text{)}.$$

При трехкратной смене воздуха в помещении $t = k'/k = 3$ часа:

$$HQ_0 = [1 + 3/180]^{180} = 19,6 \text{ (} HQ_{0 \text{ табл.}} = 20,5 \text{)}.$$

При четырехкратной смене воздуха в помещении $t = k'/k = 4$ часа:

$$HQ_0 = [1 + 4/240]^{240} = 52,8.$$

При пятикратной смене воздуха в помещении $t = k'/k = 5$ часов:

$$HQ_0 = [1 + 5/300]^{300} = 142,4.$$

Например, при объеме помещения $V_{\text{пом.}} = 54 \text{ м}^3$ и начальном коэффициенте опасности воздействия вещества $HQ_0 = 20,5$, для которого требуется трехкратная смена воздуха в помещении (таблица №3):

1. при однократном воздухообмене $L = 54 \text{ м}^3/\text{час}$ коэффициент опасности воздействия вещества HQ будет равен $HQ = 1$ через:

$$t = k'/k = 3/1 = 3 \text{ часа (} t_{\text{табл.}} = 3,05 \text{ часа, таблица №3);}$$

2. при двукратном воздухообмене $L = 108 \text{ м}^3/\text{час}$ коэффициент опасности воздействия вещества HQ будет равен $HQ = 1$ через:

$$t = k'/k = 3/1 = 1,5 \text{ часа (} t_{\text{табл.}} = 1,58 \text{ часа);}$$

3. при трехкратном воздухообмене $L = 162 \text{ м}^3/\text{час}$ коэффициент опасности воздействия вещества HQ будет равен $HQ = 1$ через:

$$t = k'/k = 1/1 = 1 \text{ час (} t_{\text{табл.}} = 1,03 \text{ часа).}$$

Вывод

Можно предположить, что одной из причин, которые приводят к так называемому «синдрому больного здания», являются химические соединения, находящиеся в воздухе помещения в особо малых концентрациях. Т.е. при концентрациях, близких к нулю, коэффициент опасности воздействия вещества уже может достигать

значений $HQ = 1$, а при высокой скорости их выделения в воздух помещения они способны повышать коэффициент опасности воздействия вещества в десятки и сотни раз.

Таблица 3. Начальные данные: $V_{пом} = 54 \text{ м}^3$, $\Delta V_{нар} = 0,9 \text{ м}^3$, $\Delta V_{нар} = 1,8 \text{ м}^3$, $\Delta V_{нар} = 2,7 \text{ м}^3$, $HQ_0 = 20,50$, $HQ_n = 1$, $HQ_{0 атм} = 0$

№п/п	$V_{пом}, \text{ м}^3$	$\Delta V_{нар}, \text{ м}^3$	HQ	$V_{нар}, \text{ м}^3$	$\Delta V_{нар}, \text{ м}^3$	HQ	$V_{нар}, \text{ м}^3$	$\Delta V_{нар}, \text{ м}^3$	HQ	$V_{нар}, \text{ м}^3$	Кол-во шагов, п	t = n/60, часов
1	54	0,0	20,50	0,00	0,0	20,50	0,00	0,0	20,50	0,00	0	0,00
7	54	0,9	18,56	5,40	1,8	16,84	10,80	2,7	15,30	16,20	6	0,10
13	54	0,9	16,81	10,80	1,8	13,83	21,60	2,7	11,42	32,40	12	0,20
18	54	0,9	15,48	15,30	1,8	11,74	30,60	2,7	8,94	45,90	17	0,28
24	54	0,9	14,02	20,70	1,8	9,64	41,40	2,7	6,67	62,10	23	0,38
29	54	0,9	12,90	25,20	1,8	8,19	50,40	2,7	5,23	75,60	28	0,47
35	54	0,9	11,69	30,60	1,8	6,72	61,20	2,7	3,90	91,80	34	0,57
40	54	0,9	10,76	35,10	1,8	5,71	70,20	2,7	3,06	105,30	39	0,65
46	54	0,9	9,74	40,50	1,8	4,69	81,00	2,7	2,28	121,50	45	0,75
51	54	0,9	8,97	45,00	1,8	3,98	90,00	2,7	1,79	135,00	50	0,83
57	54	0,9	8,12	50,40	1,8	3,27	100,80	2,7	1,33	151,20	56	0,93
63	54	0,9	7,36	55,80	1,8	2,68	111,60	2,7	1,00	167,40	62	1,03
68	54	0,9	6,77	60,30	1,8	2,28	120,60	-	-	-	67	1,12
74	54	0,9	6,13	65,70	1,8	1,87	131,40	-	-	-	73	1,22
79	54	0,9	5,65	70,20	1,8	1,59	140,40	-	-	-	78	1,30
85	54	0,9	5,11	75,60	1,8	1,30	151,20	-	-	-	84	1,40
90	54	0,9	4,71	80,10	1,8	1,11	160,20	-	-	-	89	1,48
96	54	0,9	4,26	85,50	1,8	0,91	171,00	-	-	-	95	1,58
101	54	0,9	3,93	90,00	-	-	-	-	-	-	100	1,67
107	54	0,9	3,55	95,40	-	-	-	-	-	-	106	1,77
113	54	0,9	3,22	100,80	-	-	-	-	-	-	112	1,87
118	54	0,9	2,96	105,30	-	-	-	-	-	-	117	1,95
124	54	0,9	2,68	110,70	-	-	-	-	-	-	123	2,05
129	54	0,9	2,47	115,20	-	-	-	-	-	-	128	2,13
135	54	0,9	2,24	120,60	-	-	-	-	-	-	134	2,23
140	54	0,9	2,06	125,10	-	-	-	-	-	-	139	2,32
146	54	0,9	1,87	130,50	-	-	-	-	-	-	145	2,42
151	54	0,9	1,72	135,00	-	-	-	-	-	-	150	2,50
157	54	0,9	1,56	140,40	-	-	-	-	-	-	156	2,60
163	54	0,9	1,41	145,80	-	-	-	-	-	-	162	2,70
168	54	0,9	1,30	150,30	-	-	-	-	-	-	167	2,78
174	54	0,9	1,17	155,70	-	-	-	-	-	-	173	2,88
179	54	0,9	1,08	160,20	-	-	-	-	-	-	178	2,97
184	54	0,9	1,00	164,70	-	-	-	-	-	-	183	3,05

Литература

1. Москвичи пережили самую грязную ночь лета // <http://www.gzt.ru/topnews/weather/256917.html>.
2. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М., 2004.

*Леонид Леонидович Гошка, г. Сыктывкар

Тел. раб.: +7 (8212) 29-10-24, факс: +7 (8212) 24-44-10; эл. почта: tookola@mail.ru